

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



# Sondagens eléctricas com o método Transiente no Polje de Minde

Catarina Baptista do Nascimento

Dissertação

Mestrado em Ciências Geofísicas

Especialização em Geofísica Interna

2013

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



# Sondagens eléctricas com o método Transiente no Polje de Minde

Catarina Baptista do Nascimento

Dissertação

Mestrado em Ciências Geofísicas

Especialização em Geofísica Interna

Dissertação orientada pelo Prof. Doutor Fernando Monteiro Santos

## Abstract

The time domain electromagnetic method (TDEM) is known for its ease to collect data in a short period of time. The depths reached by this method are approximately four times more than the total size of the transmitter and the receiver antenna, having a good resolution of resistivity variation and the desired profile. In this case the approximate depth of 120 meters.

This project focus a small area of called “lagoeiro” located in the area of the “Polje de Minde” (Serra de Aire e Candeeiros, Portugal), which is a particular area of interest due to the karst structure that contains one of the largest clean water reservoirs in the Iberian Peninsula.

Four TDEM profiles were made surrounding the “lagoeiro” in order to understand why the water keeps this place systematically, even after several months without rainfall.

For the data processing two programs were used. The first one is the program supplied by the manufacturer of scientific equipment used in the field, *TEM-48-700*, which makes inversion of the data assuming 1D models and the second one is a program prepared by Professor Fernando Santos, *Tem2d-v2*, which calculates the response a model pre-defined.

Key-words: Time Domain Electromagnetic (TDEM), Resistivity, Models 2D

## Resumo

O método transiente (TDEM) é conhecido pela facilidade com que se recolhem dados no campo num reduzido espaço de tempo. As profundidades atingidas através deste método são cerca de quatro vezes maiores que a dimensão total da antena do transmissor e do receptor, tendo uma boa variação e resolução de resistividade no perfil desejado.

O local escolhido para fazer sondagens com este método foi um “lagoeiro” localizado no meio do “Polje de Minde” (Serra de Aire e Candeeiros, Portugal). O interesse desta zona deve-se à estrutura cársica contém um dos maiores reservatórios de água potável da Península Ibérica.

No local foram realizados quatro perfis de sondagens TDEM de modo a circundarem o “lagoeiro”, por forma a entender por que razão a água se mantém sistematicamente neste local, mesmo após vários meses sem a ocorrência de chuvas no local.

Para o tratamento dos dados recolhidos foram utilizados dois programas. O primeiro trata-se do programa fornecido pelo fabricante do equipamento científico utilizado no campo, *TEM-48-700*, que faz inversão dos dados assumindo modelos 1D e o segundo um programa elaborado pelo Professor Fernando Santos, *Tem2d-v2*, que calcula a resposta de um modelo pré-definido.

Palavras-chave: Transiente (TDEM), Resistividade, Modelos 2D

# Índice

1.	Introdução ao Método Transiente.....	1
1.1	Fundamento teórico do método e restrições .....	1
1.2	Equações de Maxwell.....	2
1.3	Potenciais de Schelkunoff .....	3
1.4	Resposta da transiente num semi-espaço .....	5
1.5	Resistividade aparente em <i>late time</i> .....	6
1.6	Profundidade de Investigação .....	7
2.	Contexto Geológico.....	8
3.	Aquisição de dados.....	9
4.	Tratamento e análise dos dados TDEM.....	10
4.1	Perfil 1 (P1) .....	10
4.2	Perfil 4 (P4) .....	12
5.	Modelação e análise dos dados TDEM .....	14
5.1	Perfil 1 (P1) .....	14
5.2	Perfil 4 (P4) .....	16
5.2.1	Primeiro modelo (modelo 202a).....	16
5.2.2	Segundo modelo (modelo 221) .....	19
6.	Comparação quantitativa dos dados de campo com dados obtidos dos modelos.....	22
6.1	Perfil 1 (P1) .....	22
6.2	Perfil 4 (P4) .....	24
7.	Conclusões .....	27
8.	Referências .....	28

## Nomenclatura

$\mathbf{E}$	Campo eléctrico
$\mathbf{h}$	Campo magnético
$H_z$	Campo magnético vertical
$r_{TE}$	Coefficiente de reflexión
$\sigma$	Condutividade eléctrica
$\mathbf{j}$	Corrente eléctrica
$\mathbf{d}$	Deslocamento dieléctrico
$\mathbf{J}_e^S$	Fonte de corrente eléctrica
$\mathbf{J}_m^S$	Fonte de corrente magnética
$\omega$	Frequência angular
$\mathbf{b}$	Indução magnética
$\mathbf{m}$	Momento magnético
$k$	Número de onda
$\varepsilon$	Permitividade dieléctrica
$\mu_0$	Permeabilidade eléctrica
$\rho$	Resistividade eléctrica
$\rho_a$	Resistividade eléctrica aparente
$t$	Tempo

## 1. Introdução ao Método Transiente

O método transiente, mais conhecido pela comunidade científica por *Time Domain Electromagnetic* (TDEM), é um método geofísico não intrusivo que possibilita o estudo de uma estrutura geológica cuja resposta à emissão de ondas electromagnéticas (EM), impulsionadas por uma fonte artificial, se traduz na interpretação de propriedades físicas do material geológico. Estas não permitem precisar qual é o material existente, mas apenas afirmar a forte probabilidade de ser esse material. Para se ter certezas teria de se recorrer a métodos intrusivos, como é o caso dos furos.

Este método tem vindo a ser desenvolvido desde o final da década de 70. A evolução tecnológica teve um papel fundamental neste método, uma vez que permitiu o melhoramento significativo no equipamento utilizado tornando-o cada vez mais acessível a nível de aquisição e interpretação.

### 1.1 Fundamento teórico do método e restrições

Os métodos electromagnéticos são métodos de indução de um campo magnético, denominado campo magnético principal, gerado por uma corrente eléctrica alternada produzida por uma bobine transmissora. O campo induzido para o solo espalha-se de forma circular e ao alcançar material geológico condutor é criado um campo magnético secundário, a partir da geração de correntes eléctricas alternadas com difusão perpendicular ao campo principal. É o campo secundário que permite diferenciar os vários materiais geológicos, logo terá de ser este o campo detectado pelo receptor do equipamento científico.

O que diferencia o método transiente dos outros métodos electromagnéticos é que este detecta o campo secundário sem a presença do principal, uma vez que o campo principal é muito superior ao secundário, mascarando-o. A detecção do campo secundário é feita quando o campo principal está desligado. As sucessivas correntes eléctricas emitidas para o subsolo espalham-se de forma circular aumentando o seu raio e diminuindo a intensidade com a profundidade, evolução parecida com um “anel de fumo”. Os dados recolhidos logo após ao corte de corrente (*early times*) corresponde ao material geológico mais superficial e os dados recolhidos mais tarde (*late times*) corresponde ao material mais profundo (Kirsch et al, 2006).

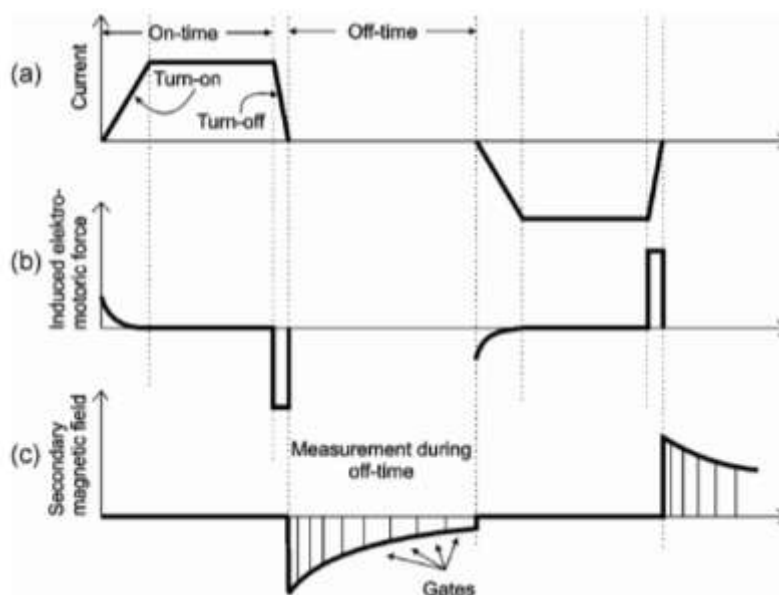


Figura 1.1.1 - Princípios básicos da método TDEM, (a) a variação temporal da corrente induzida através do transmissor, (b) evolução da força electromotriz no solo e (c) medição do campo magnético secundário gerado e recebido pelo receptor do equipamento (Kirsch et al, 2006).

Neste método é utilizado o processo de *stacking*, processo que permite a eliminação de ruído aleatório através do somatório dos consecutivos sinais recebidos correspondentes a diferentes sinais emitidos, aumentando assim a relação sinal/ruído (*signal/noise* – S/N) permitindo a captação de sinais mais fracos referentes a profundidades maiores. Existe duas fontes de ruído que devem ser tidas sempre em conta, ruído natural e artificial. As sucessivas variações de campo magnético terrestre correspondem ao ruído natural. O ruído artificial corresponde à actividade humana, como por exemplo à distribuição da rede eléctrica. Existe também um ruído associado ao próprio equipamento em uso, que à partida é negligenciável (Fitterman e Labson, 2005).

O acoplamento é um factor a considerar e a evitar, visto mascarar os dados obtidos induzindo o cientista em erro, ou seja, nas imediações das sondagens não pode haver materiais condutores, ou efeitos que criem correntes, como é o caso do leito de um rio. Existe uma distância mínima de 100m que deve ser respeitada de modo a evitar este problema. Há dois tipos de acoplamento, galvânico e capacitivo. No caso do galvânico a corrente eléctrica induzida nos materiais condutores nos arredores passa para o solo, sendo conduzida e no capacitivo o retorno é efectuado por indução de corrente.

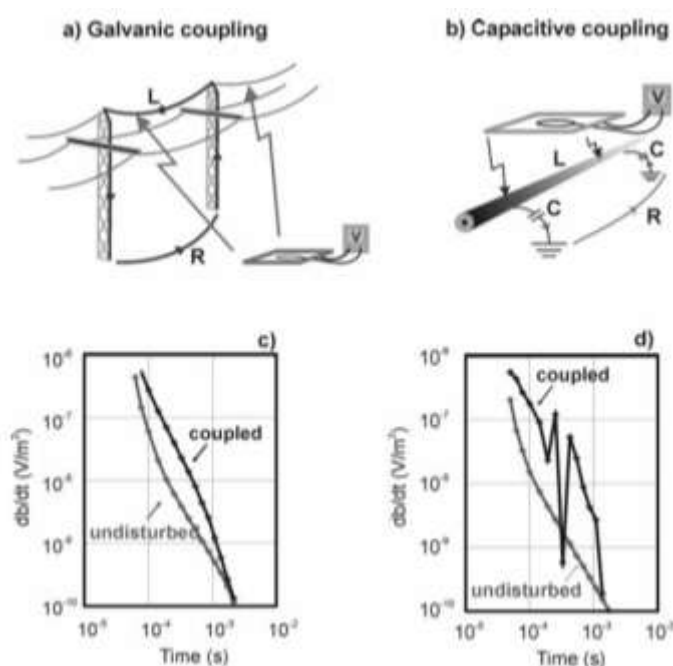


Figura 1.1.2 – Acoplamento nas sondagens TDEM, a) exemplo prático do galvânico, b) exemplo do capacitivo, c) visualização da diferença entre dados não poluídos e os dados ruidosos por acoplamento galvânico e d) visualização dos dados poluídos e limpos por acoplamento capacitivo (Kirsch et al, 2006).

## 1.2 Equações de Maxwell

Segundo James Maxwell, o campo magnético pode ser descrito por as seguintes quatro equações com as cinco funções vectoriais: campo eléctrico ( $\mathbf{E}$ ), indução magnética ( $\mathbf{b}$ ), campo magnético ( $\mathbf{h}$ ), deslocamento dieléctrico ( $\mathbf{d}$ ) e corrente eléctrica ( $\mathbf{j}$ ). A razão pela qual se tem as funções vectoriais em letras minúsculas e maiúsculas nas equações é apenas para distinguir o seu uso no domínio no tempo (minúsculas) e na frequência (maiúsculas), embora elas estejam representadas em baixo no domínio do tempo, uma vez que serão desacopladas em equações diferenciais lineares. A densidade de carga eléctrica é representada por  $\rho$  e o tempo por  $t$ .



$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} \quad (1.2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{h} = \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} + \mathbf{j} \quad (1.2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0 \quad (1.2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = \rho \quad (1.2.4)$$

A eq. 1.2.1 descreve a Lei de Faraday, geração de uma força electromotriz a partir de um campo magnético num circuito eléctrico fechado. A Lei de Ampère corresponde à eq. 1.2.2, que representa as fontes ou os sumidouros do campo eléctrico. A Lei de Gauss para o campo magnético é demonstrada pela eq. 1.2.3 representando a ausência de fontes ou sumidouros no campo magnético e a eq. 1.2.4 é para o campo eléctrico.

As equações de Maxwell, para este caso, podem ser simplificadas ficando apenas com as seguintes equações.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.2.5)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.2.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1.2.7)$$

Aplicando a transformada de Fourier converte-se as equações 1.2.1 e 1.2.2 para o domínio da frequência, obtendo-se as equações seguintes.

$$\nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mu_0 \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{E} + \hat{z} \mathbf{H} = -\mathbf{J}_m^S \quad (1.2.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - (\sigma + i\varepsilon\omega) \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{H} - \hat{y} \mathbf{E} = \mathbf{J}_e^S \quad (1.2.9)$$

Onde  $\mathbf{J}_m^S$  é a fonte de corrente magnética e  $\mathbf{J}_e^S$  é a fonte de corrente eléctrica. Caso se trate de um meio homogéneo ambas as fontes seriam nulas.

### 1.3 Potenciais de Schelkunoff

Com o intuito de simplificar a derivação por diferenciação de  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$  substitui-se por  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{F}$  (Ward e Hohmann, 1988). O campo eléctrico e o campo magnético podem ser escritos como a sobreposição das fontes eléctricas e magnéticas.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m + \mathbf{E}_e \quad (1.3.1)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_m + \mathbf{H}_e \quad (1.3.2)$$

Para as fontes magnéticas,  $\mathbf{J}_e^S$ , e para as fontes eléctricas,  $\mathbf{J}_m^S$ , assume-se que são zero. Até então as equações foram todas redigidas de forma geral. No caso particular do método transiente considera-se o uso de uma fonte magnética transmitindo um campo eléctrico transversal. Devido a esta simplificação só  $\mathbf{F}$  é que entra para os cálculos, logo o potencial de Schelkunoff,  $\mathbf{F}$ , é definido através da eq. 1.3.3.

$$\mathbf{E}_m = -\nabla \times \mathbf{F} \quad (1.3.3)$$

Usando a eq. 1.8 pode-se fazer a derivação da equação de Helmholtz não homogénea obtem-se a eq. 1.3.4, onde  $k$  é o número de onda definido na eq. 1.3.5.

$$\nabla^2 \mathbf{F} + k^2 \mathbf{F} = -\mathbf{J}_m^S \quad (1.3.4)$$

$$k^2 = \mu_0 \varepsilon \omega^2 - i \mu_0 \sigma \omega = -\hat{z} \hat{y} \quad (1.3.5)$$

Para materiais terrestres, e para frequências menores que  $10^5 \text{Hz}$ , a corrente de deslocamento é muito mais pequena que a corrente de condução. Assim sendo  $\mu_0 \varepsilon \omega^2 \ll \mu_0 \sigma \omega$ , logo  $k^2 \approx -i \mu_0 \sigma \omega$ . Esta aproximação denomina-se quasi-estática.

Usando o potencial de Schelkunoff,  $\mathbf{F}$ , pode-se derivar os campos magnético e eléctrico para uma fonte magnética.

$$\mathbf{E}_m = -\nabla \times \mathbf{F} \quad (1.3.6)$$

$$\mathbf{H}_m = -\hat{y} \mathbf{F} + \frac{1}{\hat{z}} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{F}) \quad (1.3.7)$$

Admitindo que a Terra é a uma dimensão,  $\mathbf{F}$  teria apenas a componente  $z$ , onde  $F_z$  é o escalar das três direcções e  $\mathbf{u}_z$  o vector unitário em  $z$ .

$$\mathbf{F} = F_z \mathbf{u}_z \quad (1.3.8)$$

Substituindo a eq. 1.3.8 nas eqs. 1.3.6 e 1.3.7 tem-se estes dois sistema de equações com todas as componentes dos campos.

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 F_z}{\partial x \partial z} \\ H_y &= \frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 F_z}{\partial x \partial z} \\ H_z &= \frac{1}{\hat{z}} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) F_z \end{aligned} \quad (1.3.9)$$

$$\begin{aligned}
E_x &= -\frac{\partial F_z}{\partial y} \\
E_y &= \frac{\partial F_z}{\partial x} \\
E_z &= 0
\end{aligned} \tag{1.3.10}$$

#### 1.4 Resposta da transiente num semi-espço

Como anteriormente dito o campo transmitido é transversal ao campo eléctrico, logo apenas será necessário fazer a derivada vertical do campo magnético no centro do *loop* considerado. No campo a forma mais simples e que melhor se adequa e aproxima matematicamente de um círculo perfeito é um quadrado que de comprimento corresponda ao diâmetro total pretendido do círculo para que através da sua área se possa calcular a integração dos dipolos magnéticos verticais. A eq.1.4.1 representa um dipolo magnético segundo o potencial de Schelkunoff, onde  $m$  é o momento magnético inicial do dipolo,  $J_0$  é a função de Bessel inicial em ordem a zero,  $TE$  é o campo eléctrico transversal,  $r_{TE}$  é o coeficiente de reflexão,  $\lambda = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  onde  $k_x$  e  $k_y$  são as frequências espaciais segundo  $x$  e  $y$  respectivamente,  $u_n = \sqrt{\lambda^2 + k_n^2}$  onde  $k_n$  é o número de onda na camada e a distância entre o centro do *loop* e o receptor é dada por  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

$$F(\rho, z) = \frac{\hat{z}_0 m}{4\pi} \int_0^\infty [e^{-u_0|z+h|} + r_{TE} e^{u_0(z-h)}] \frac{\lambda}{u_0} J_0(\lambda \rho) d\lambda \tag{1.4.1}$$

Integrando a equação anterior sobre um círculo de raio  $a$  e corrente  $I$  obtém-se a eq.1.4.2.

$$F(\rho, z) = \frac{\hat{z}_0 I a}{2} \int_0^\infty \frac{1}{u_0} [e^{-u_0|z+h|} + r_{TE} e^{u_0(z-h)}] \frac{\lambda}{u_0} J_1(\lambda a) J_0(\lambda \rho) d\lambda \tag{1.4.2}$$

O campo magnético vertical é obtido através da simplificação da distância  $\rho$  usando a eq.1.3.7.

$$H_z = \frac{I a}{2} \int_0^\infty [e^{-u_0|z+h|} + r_{TE} e^{u_0(z-h)}] \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda a) d\lambda \tag{1.5.3}$$

Esta equação é representada no domínio da frequência. No domínio do tempo, a resposta da transiente é obtida pela transformada inversa de Laplace ou pela transformada de Fourier. Qualquer uma das soluções não se consegue resolver analiticamente, mas pode ser usada através de métodos numéricos. Considerando um *loop* central na superfície de semi-espço homogéneo  $r_{TE}$  é dado pela eq.1.4.4, e a simplificação da equação anterior, com estas considerações, é dada pela eq.1.4.5.

$$r_{TE} = \frac{\lambda - u}{\lambda + u} \tag{1.4.4}$$

$$H_z = Ia \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda - u} J_1(\lambda a) d\lambda \quad (1.4.5)$$

Admitindo que  $\mathbf{b} = \mu_0 \mathbf{h}$ , pode-se resolver a equação em ordem a  $\mathbf{b}$  através da aplicação da transformada de Laplace, onde  $\theta = \sqrt{\mu_0 \sigma / 4t}$  e  $\text{erf}$  é o erro da função.

$$b_z = \frac{\mu_0 I}{2a} \left[ \frac{3}{\pi^{1/2} \theta a} e^{-\theta^2 a^2} + \left( 1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \right) \text{erf}(\theta a) \right] \quad (1.4.6)$$

Este é o valor de intensidade magnética no instante imediatamente antes de ser desligada a corrente. A resposta ao impulso dá-se de acordo com a derivada do tempo.

$$\frac{\partial b_z}{\partial t} = -\frac{I}{\sigma a^3} \left[ 3\text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\pi^{1/2}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (1.4.7)$$

São estas as equações que explicam o método transiente, mas apenas se aplicam segundo a componente vertical do campo e no centro do *loop* transmissor.

### 1.5 Resistividade aparente em *late time*

A resposta ao impulso magnético ( $\partial b_z / \partial t$ ) varia no tempo de acordo com a eq.1.4.7. A fig.1.6.1 representa a resposta do método transiente em dois ambientes distintos.

Na alínea a) da figura seguinte verifica-se que está representado o gráfico da resposta ao impulso magnético, após a corrente ser desligada, em função do tempo. Para *late time* verifica-se que a resposta varia drasticamente. Se se fizer a aproximação para *late time*, ou seja,  $\theta \rightarrow 0$ , a eq.1.4.7 traduz-se na eq.1.5.1.

$$\frac{\partial b_z}{\partial t} \approx -\frac{I \sigma^{3/2} \mu_0^{5/2} a^2}{20 \pi^{1/2}} t^{-5/2} \quad (1.5.1)$$

Ao derivar a equação anterior para *late time* fica-se com a eq.1.5.2.

$$\rho_a = \left( \frac{I a^2}{20 \partial b_z / \partial t} \right) \frac{\mu_0^{5/3}}{\pi^{1/3}} t^{-5/3} \quad (1.5.2)$$

O gráfico da evolução temporal da resistividade aparente é mais intuitivo que o da evolução da resposta ao impulso magnético. É de referir que as variações de resistividade aparente não são forçosamente alterações na geologia. Tem de se proceder a uma avaliação minuciosa de toda a curva para se poder tirar essas ilações.

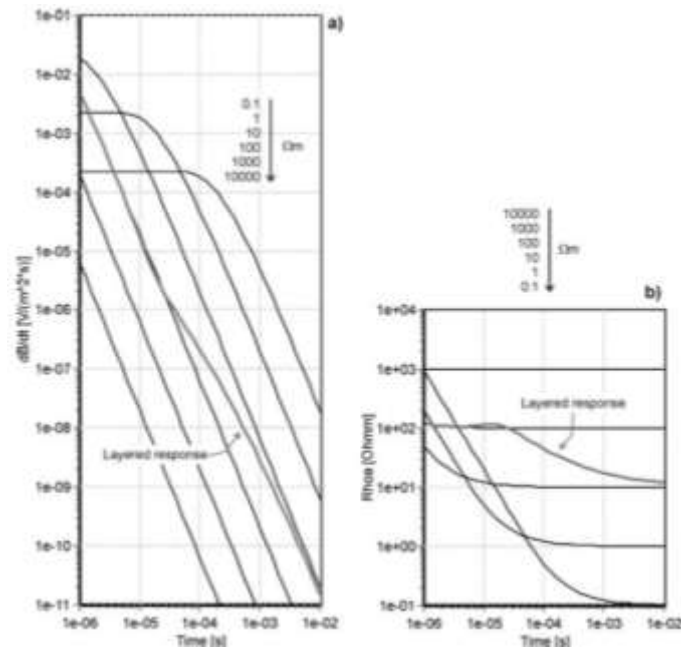


Figura 1.5.1 – A linha preta corresponde aos vários valores de resistividade aparente apresentados em cada gráfico num semi-espço homogéneo e a linha cinzenta (layered response) representa um meio de duas camadas com resistividade de 100 $\Omega \cdot m$ , para a primeira camada (com profundidade de 40m), e de 10 $\Omega \cdot m$  para a segunda (considerada infinita). Em a) tem-se a evolução temporal da resposta ao impulso magnético e em b) a curva da resistividade aparente para a resposta em a) (Kirsch et al, 2006).

## 1.6 Profundidade de Investigação

A profundidade de investigação é um parâmetro com interesse significativo na geofísica aplicada. A profundidade determinada designa-se por profundidade difusa, uma vez que se trata da profundidade máxima conseguida sem haver perturbações da corrente emitida ou de factores atenuantes geoelectricos.

$$z_d = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \approx 1.26 \times \sqrt{\rho t} \quad (1.6.1)$$

Esta é a equação para a aquisição aérea. No caso de loop's no solo, esta profundidade é cerca de 1.8 vezes menor (Kirsch et al, 2006).

Quando a curva de dados adquiridos deixa de ter uma forma consistente e linear considera-se que a partir desse ponto os dados não são suficientemente fiáveis para determinar o material geoelectrico lá existente.

## 2. Contexto Geológico

A área em estudo, Polje de Minde, está inserida numa região do país muito rica do ponto de vista geomorfológico denominada por zona cársica, inserida no Maciço Calcário Estremenho (Carvalho, J. M. F., 1996).

Esta zona é composta por calcários e dolomitos jurássicos oxfordianos com cerca de 160 milhões de anos. Ao longo do tempo a área foi sofrendo alteração geomorfológicas devido à dissolução dos calcários por acção da água. Esta actua como agente físico-químico e molda a forma dos calcários originando estruturas “rendilhadas” (Crispim, J. A., 1995). À superfície formam-se lapiás e dolinas e em profundidade algares, que por sua vez dão lugar às grutas.

A estrutura geológica estudada trata-se de uma dolina, conhecida e denominada pela população local por “lagoeiro”, situada a  $39^{\circ}31'29.20''\text{N}$ ,  $8^{\circ}42'23.00''\text{W}$ .



Figura 2.1 – Localização da área em estudo, dolina no Polje de Minde.

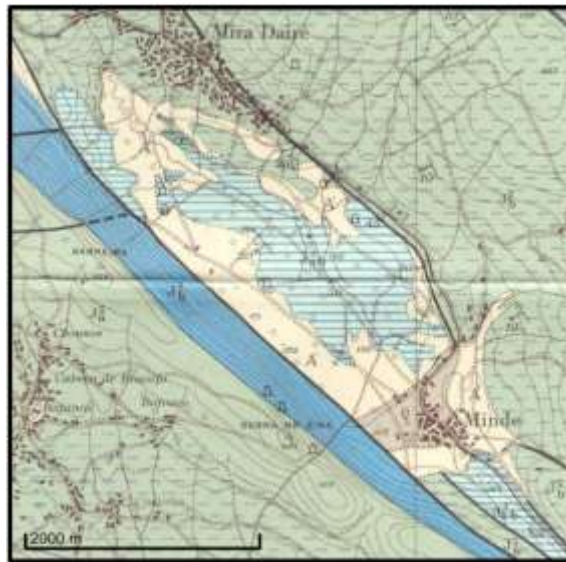


Figura 2.2 - Pequeno excerto da carta geológica 27-A, correspondente ao local estudado. A área azul clara rasurada com riscas azuis mais escuras corresponde à Era Jurássico Oxfordiano, onde está inserida a zona estudada.

### 3. Aquisição de dados

Os dados foram recolhidos com o equipamento, o *TEM-FAST 48HPC*. O instrumento permite o uso de uma corrente máxima de 4A no transmissor e apenas permite recolher dados da componente z do fluxo.



Figura 3.1 – *TEM-FAST 48HPC*, equipamento científico utilizado para recolha dos dados no campo .

Para além do equipamento científico foi necessário o uso de um fio de cobre para servir antena do transmissor e do receptor. Usaram-se *loop's* coincidentes de 25m em quatro perfis que desenhavam um rectângulo de 125mx100m que limitava a área de estudo. Os perfis 1 e 2, com orientação N55W, eram compostos por cinco *loop's* enquanto os perfis 3 e 4, perpendiculares aos perfis 1 e 2, eram apenas quatro. Cada *loop* era composto por 2 voltas (*turn's*) uma vez que o comprimento total do fio de cobre era de 200m.



Figura 3.2 – Imagem de satélite onde estão esquematizados os perfis realizados em campo. A linha azul corresponde ao perfil 1 (P1) composto por 5 sondagens. A linha verde corresponde ao perfil 2 (P2) com 5 sondagens. A linha preta corresponde ao perfil 3 (P3) constituído por 4 sondagens. A linha vermelha corresponde do perfil 4 (P4) com 4 sondagens.

## 4. Tratamento e análise dos dados TDEM

Apesar de se terem feito quatro perfis, apenas foram estudados dois deles, o perfil 1 (P1) e o perfil 4 (P4).

Com o auxílio do *software* TEM-48CONV-2000 converteram-se os ficheiros com os dados adquiridos para o formato .txt para poderem ser analisados no *software* TEM-48-700. Este último permite inverter os dados assumindo modelos 1D. Os resultados podem ser apresentados em pseudo-seções 2D, juntando-se os modelos de todas as sondagens do mesmo perfil num só ficheiro.

Inicialmente processaram-se as sondagens uma a uma e posteriormente juntaram-se os modelos para se poder visualizar o comportamento de todo o perfil.

### 4.1 Perfil 1 (P1)

Os dados obtidos para este perfil estão representados na figura 4.1.1. Para se puder obter um modelo mais preciso eliminaram-se os pontos “ruidosos”. A partir da “curva limpa” procedeu-se à análise dos dados disponível usando o *software* do fabricante do equipamento, originando um ficheiro de texto com valores de resistividade e profundidades. É de salientar que a sondagem 5 tem valores de resistividade um pouco acima das restantes sondagens deste perfil. Por volta dos 0,6s todas as sondagens têm ruído associado.

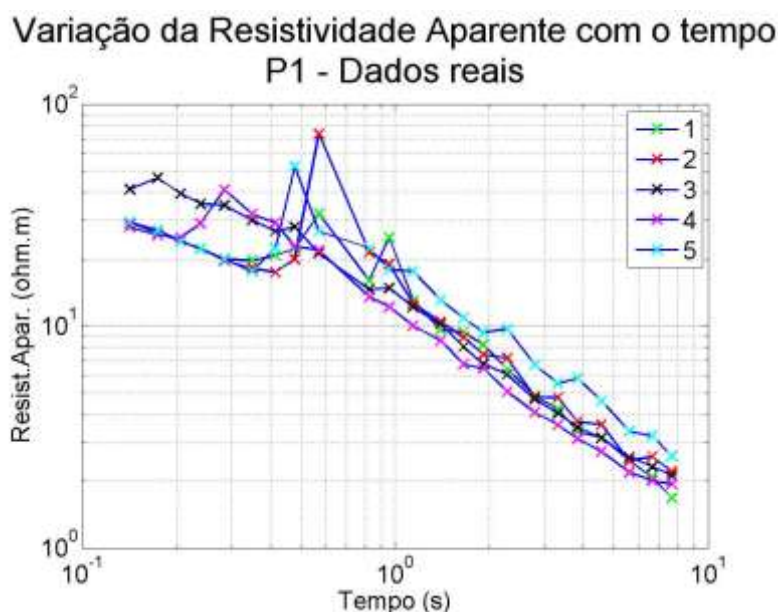


Figura 4.1.1 – Dados obtidos, com o equipamento científico usado, para o perfil 1. Cada curva corresponde a uma sondagem diferente.

Depois de ter feito este procedimento para cada sondagem, juntaram-se todas as sondagens num só ficheiro que corresponde ao perfil. O *software* disponibiliza uma opção que desenha o perfil, mostrando o ponto central de cada sondagens e a forma como varia a resistividade em profundidade. As figuras 4.1.2 e 4.1.3 representam duas formas diferentes do acima descrito.

A figura 4.1.2 mostra a variação da resistividade com a profundidade. A linha vermelha mostra essa mesma variação para cada sondagem individualmente, sem dar acesso ao valor de resistividade correspondente a cada variação dessa mesma linha. Regra geral para todas as sondagens a



resistividade diminui em profundidade, embora a resistividade da última camada detectada pela sondagem 1 seja ligeiramente mais alta que a imediatamente acima desta.

A figura 4.1.3 mostra o mesmo que a anterior com a vantagem de ser uma pseudo-secção 2D, fazendo uma interpolação entre cada duas sondagens consecutivas, sugerindo um a variação da resistividade não só em profundidade, mas também em comprimento para todo o perfil em estudo. Aqui consegue ter-se uma melhor percepção de como a resistividade varia tendo acesso aos valores de resistividade através da escala de cores. Neste perfil temos estruturas geológicas a variar entre os 30Ω.m e os 0,1Ω.m. Tal como foi exposto anteriormente as camadas neste perfil são estratificadas e a resistividade tende a diminuir com a profundidade.

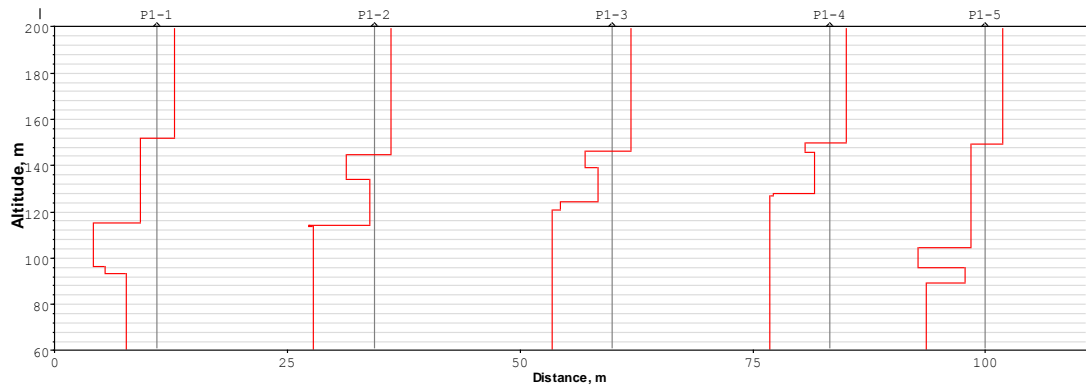


Figura 4.1.2 – Variação da resistividade em profundidade para cada sondagem do perfil em estudo.

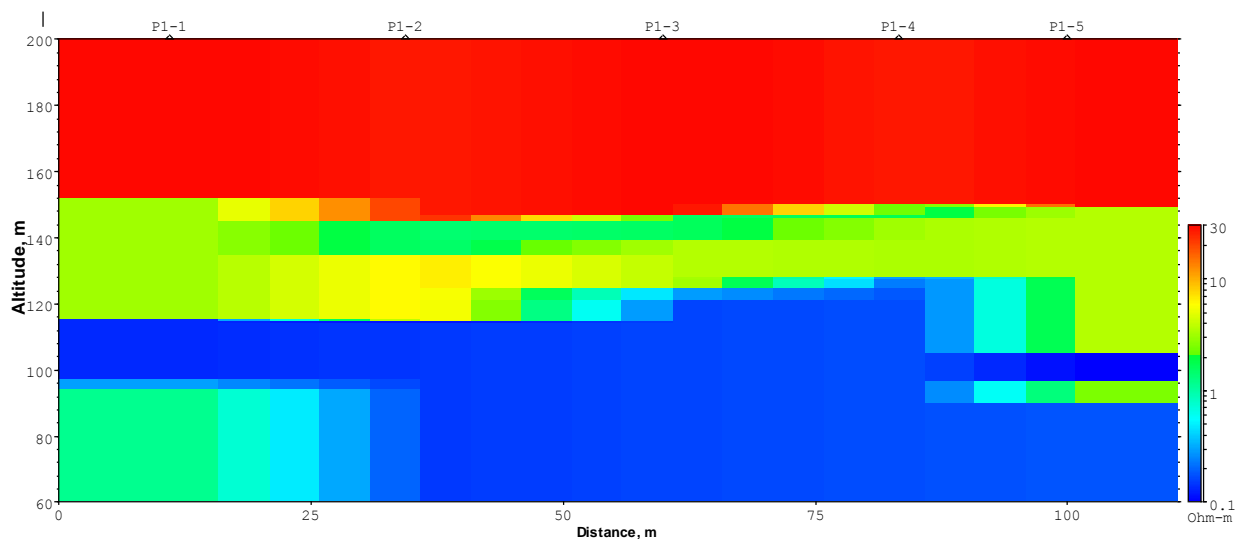


Figura 4.1.3 – Esquema 2D da variação da resistividade em todo o perfil considerado.

De acordo com os dados apresentados na figura de cima verifica-se que se trata de uma zona estratificada em que o material é mais resistivo à superfície.

## 4.2 Perfil 4 (P4)

Tal como para o perfil anterior foi feita uma pré-análise com a intenção de retirar os pontos com ruído associado para que a qualidade da análise de dados fosse melhor. A figura 4.2.1 mostra os dados “em bruto” de todas as sondagens do perfil 4. A sondagem 1 deste perfil é a mesma que a sondagem 1 do perfil 1, uma vez que os perfis escolhidos cruzam-se nesta sondagem. É de notar que a sondagem 3 tem um nível elevado de ruído e tem uma resistividade mais elevada para todos os pontos em comparação com as restantes deste perfil. A sondagem 4 é muito consistente e linear em todos os seus pontos, praticamente não tem ruído associado.

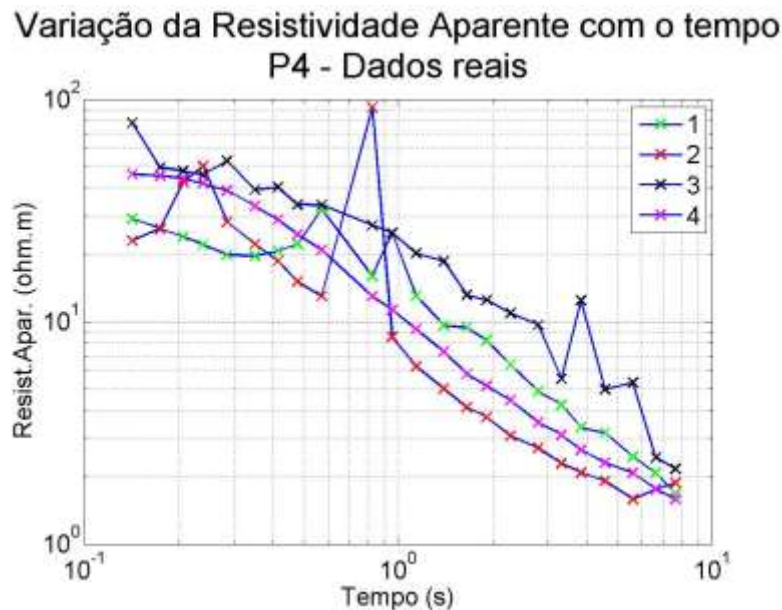


Figura 4.2.1 – Dados obtidos, com o equipamento científico usado, para o perfil 4. Cada curva corresponde a uma sondagem diferente.

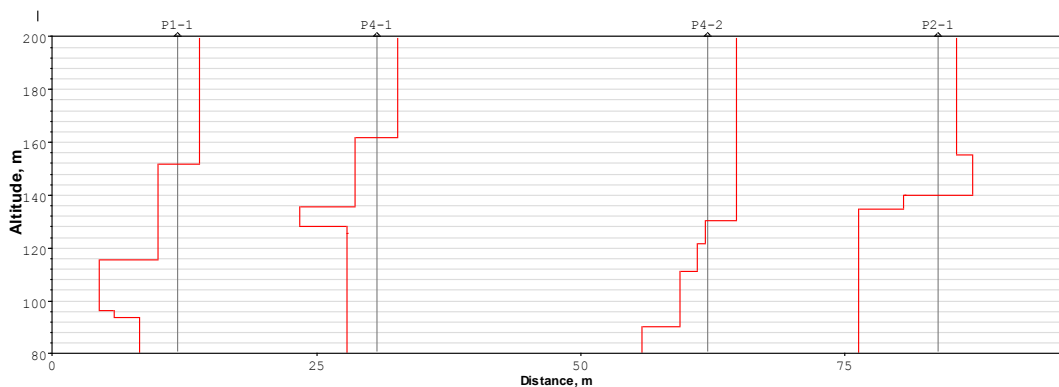


Figura 4.2.2 – Variação da resistividade em profundidade para cada sondagem do perfil em estudo.

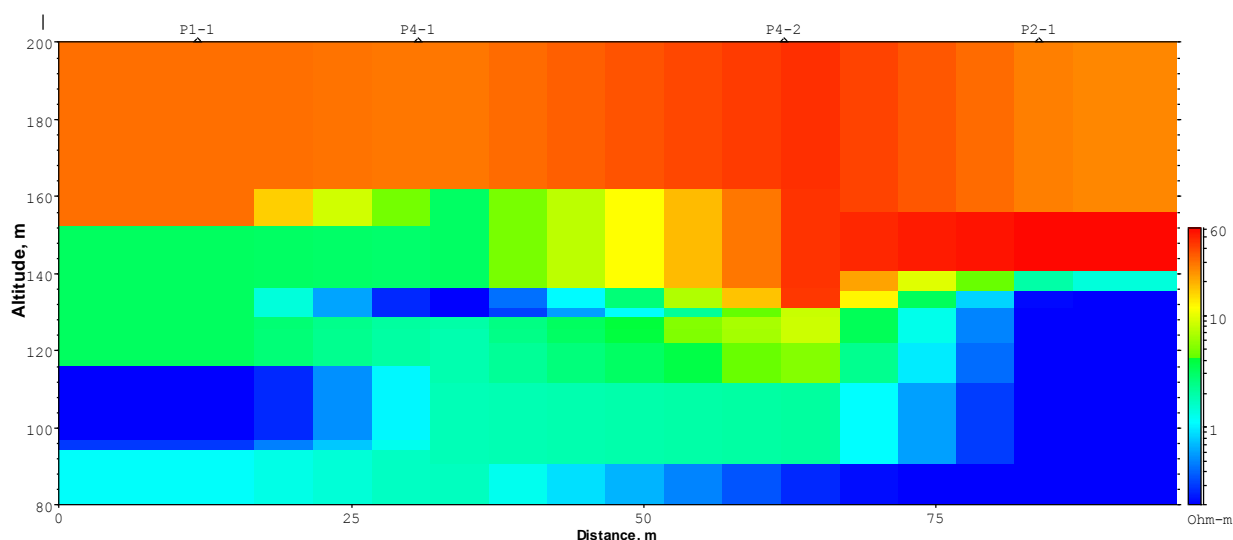


Figura 4.2.3 – Esquema 2D da variação da resistividade em todo o perfil considerado.

Tal como no caso do primeiro perfil, fez-se um só ficheiro com os dados de todas as sondagens para estes dados pudessem ser interpolados pelo software do equipamento usado.

Ao analisar a figura 4.2.2 verifica-se que os modelos deste perfil são mais heterogéneos que os do modelo anterior. A resistividade tende a diminuir com a profundidade, embora haja algumas pequenas excepções. Tal como foi referido em cima, a sondagem 1 deste perfil é a mesma que a sondagem 1 do perfil anterior, logo o comportamento da sondagem é o mesmo. Na sondagem 2, que na figura corresponde a “P4-1”, existe um corpo menos resistivo entre os 140m e os 130m, tendo a camada logo abaixo uma resistividade um pouco mais elevada que esta. A sondagem 4, designada figura como “P2-1”, mostra uma camada entre os 160m e os 140m que tem a resistividade mais alta de todo o perfil em estudo e a camada menos resistiva encontra-se a entre os 135m, aproximadamente, até aos 80m.

A figura 4.2.3 evidencia o acima descrito com o auxílio da escala de cores referente aos valores de resistividade. Para este perfil os valores de resistividade variam entre  $60\Omega.m$  e  $0.1\Omega.m$ .

## 5. Modelação e análise dos dados TDEM

Para a modelação dos dados foi utilizado o programa escrito pelo Professor Doutor Fernando Santos de nome *Tem2d-v2*. Este programa calcula a resposta de um modelo 2D que, neste caso, foi construído com base nos modelos 1D calculados anteriormente. Cria-se então, um ficheiro de texto, que serve de entrada para o programa em uso. De acordo com os dados reais modifica-se o ficheiro de texto de forma a que a resposta do modelo seja o mais semelhante possível com os dados, com o intuito de verificar se o modelo faz uma boa representação da zona em estudo. Do modelo usado saem três ficheiros de texto. O ficheiro de nome FSITES.txt tem na primeira coluna o tempo e a segunda a resistividade modelada para o tempo indicado. O ficheiro bz.txt tem o tempo na primeira coluna e na segunda o fluxo modelado correspondente àquele instante. O ficheiro TEModel.txt representa a matriz dos valores de resistividade do perfil considerado.

Para se poder visualizar o modelo através de imagens foi utilizado o *software Matlab*.

### 5.1 Perfil 1 (P1)

A figura seguinte representa o modelo 2D do perfil 1. Para reproduzir esta figura foi utilizado o ficheiro de texto TEModel. Este modelo foi construído por tentativa e erro, isto é, foi construído um modelo inicial com base nos modelos 1D apresentados na secção anterior que foi sendo alterado até que a sua resposta ajustasse aos dados de campo de modo aceitável. Na figura verifica-se, que no perfil em estudo, a resistividade vai diminuindo à medida que a profundidade aumenta. Para o primeiro receptor verifica-se que a última camada modelada tem resistividade um pouco mais elevada que a camada imediatamente acima dessa. Neste caso o modelo tem valores de resistividade compreendidos entre  $35\Omega.m$  e  $0,01\Omega.m$ .

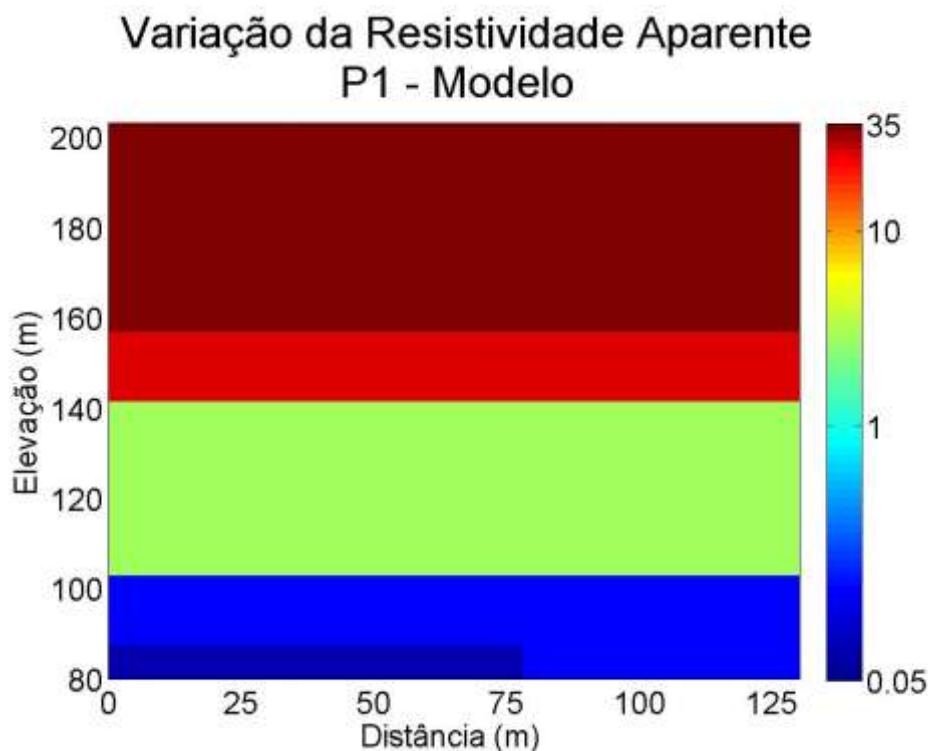


Figura 5.1.1 – Modelo 2D de resistividade para o perfil 1, considerando todos os receptores existentes no perfil em estudo.

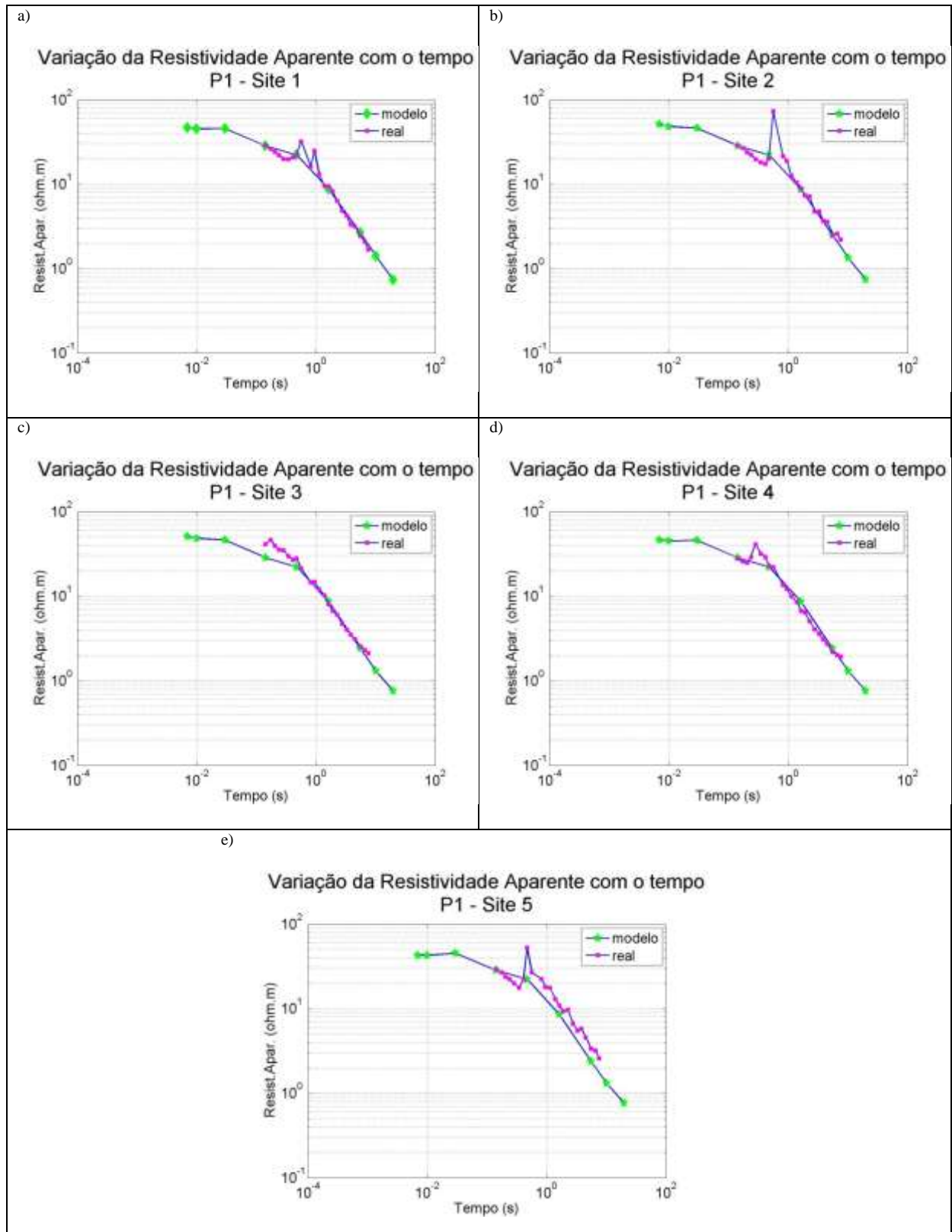


Figura 5.1.2 – Conjunto de gráfico que comparam os dados reais obtidos de resistividade através do equipamento científico usado (curva com os dados a rosa) com os dados modelados a partir do modelo fornecido (curva com os dados a verde).

Na figura 5.1.2 apresenta-se a comparação entre os dados de campo e as respostas do modelo apresentado na figura 5.1.1.

Para este perfil verifica-se, a partir da figura 5.1.2, que em geral o ajustamento (visual) entre os dados de campo e a resposta do modelo são bastante bons. Na quinta sondagem observa-se que os dados estão muito contaminados por ruído sendo muito difícil obter-se um bom ajustamento. Esta última não é confiável o suficiente para se fazer um tratamento estatístico correcto.

## **5.2 Perfil 4 (P4)**

Para este perfil serão apresentados dois modelos com características diferentes. No primeiro tem-se um melhor ajuste (ms) entre os dados e as respostas do modelo. Contudo, a sua interpretação geológica parece-se mais problemática que no caso do segundo modelo que apresenta um rms mais elevado. Inicialmente irá proceder-se à análise do primeiro modelo calculado e designado por 202a e posteriormente o segundo modelo (221).

Tal como para o perfil anterior recorreu-se ao software *Matlab* para representar os dados de resistividade modelados.

### **5.2.1 Primeiro modelo (modelo 202a)**

Tal como no caso do modelo do perfil 1, construiu-se um modelo inicial com base nos modelos 1D que foi sendo alterado (método tentativa e erro) até se obter um ajustamento entre os dados de campo e as respostas do modelo que fosse aceitável. A figura 5.2.1.1 mostra o modelo de resistividade aparente obtido ao fim de várias tentativas. Para a modelação obtida tem-se um perfil com corpos de resistividade aparente diferentes para a mesma profundidade. Não se trata de um perfil estratificado, mas sim heterogéneo. A zona nas proximidades do receptor três é o que apresenta mais heterogeneidades. À superfície existem, na vizinhança deste mesmo receptor, dois corpos com resistividades aparentes muito mais baixas que os corpos vizinhos. No perfil existem três corpos bem definidos mais ou menos à mesma profundidade com resistividades aparentes na ordem dos  $0,15\Omega.m$ . Ainda é evidente a existência de mais dois corpos bem definidos de resistividade aparente  $2,5\Omega.m$ . O primeiro encontra-se a uma distância compreendida entre os 50m e os 60m a cerca de 60m da superfície e o segundo encontra-se por debaixo de receptor quatro a uma profundidade de 80m. Neste modelo os valores de resistividade aparente estão compreendidos entre os  $70\Omega.m$  e os  $0,15\Omega.m$ , embora na escala de cores esteja entre os  $70\Omega.m$  e os  $0,10\Omega.m$ .

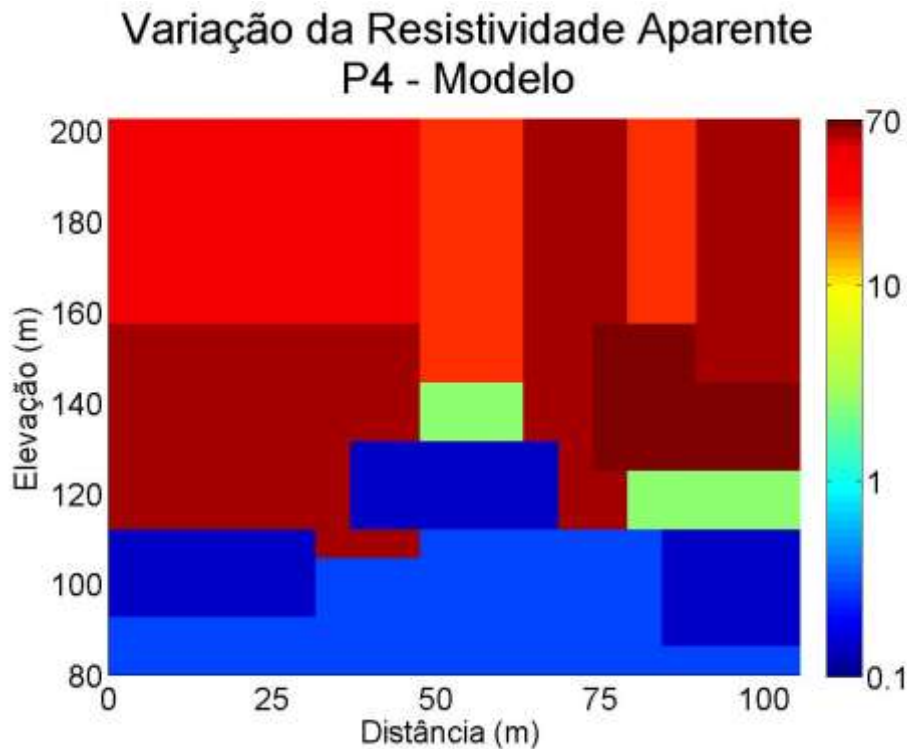


Figura 5.2.1.1 – Modelo 2D de resistividade para o perfil 4, calculado a partir do ficheiro 202a, considerando todos os receptores existentes no perfil em estudo.

A figura de baixo corresponde ao modelo 202a. Esta mostra o comportamento da resistividade aparente modelada ao longo do tempo para todos os receptores considerados no modelo, que neste perfil são quatro. As curvas de resistividade aparente representadas na figura mostram que os receptores 1, 2 e 4 têm comportamentos semelhantes, embora os valores de resistividade aparente sejam todos diferentes entre si para cada instante. A curva do receptor 3 tem um comportamento diferente, onde é notório o aumento de resistividade para o segundo tempo, em vez de diminuir ligeiramente como acontece para os outros receptores considerados. Estas curvas correspondem a um meio que não é estratificado ao contrário do caso anterior. Trata-se de um perfil com geologia muito diversificada.

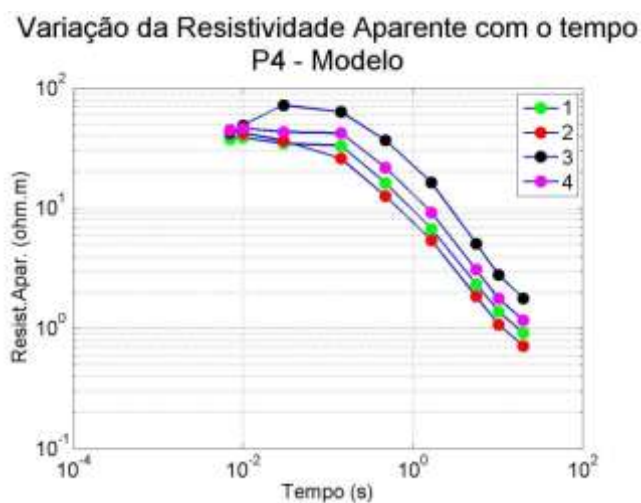


Figura 5.2.1.2 – Dados calculados do modelo usado considerando todos os receptores (sondagens para o tratamento do caso real) existentes no perfil 4 para o modelo 202a.

Comparando as respostas do modelo 2D com os dados reais tratados (figura 5.2.1.3) verifica-se que neste perfil o ajustamento não é tão bom como o modelo apresentado para o perfil 1. Para a primeira sondagem verifica-se que a curva modelada tem um comportamento parecido à curva de resistividade aparente real, ao eliminar os pontos com ruído. Para a segunda sondagem é visível a existência de muitos pontos contaminados por ruído nos primeiros instantes da curva, sendo apenas a última parte desta aproveitada, tendo para neste caso apenas dois pontos de comparação, o que não permite fazer uma comparação fiável. Tal como para o perfil anterior, a curva da terceira sondagem é muito instável. Trata-se de uma curva com muitas variações entre instantes vizinhos tendo sido eliminados muitos pontos aquando do tratamento no *software* do fabricante do equipamento científico. A sondagem quatro para os dados reais é muito bem definida mas a curva modelada não representa muito bem as características desta sondagem.

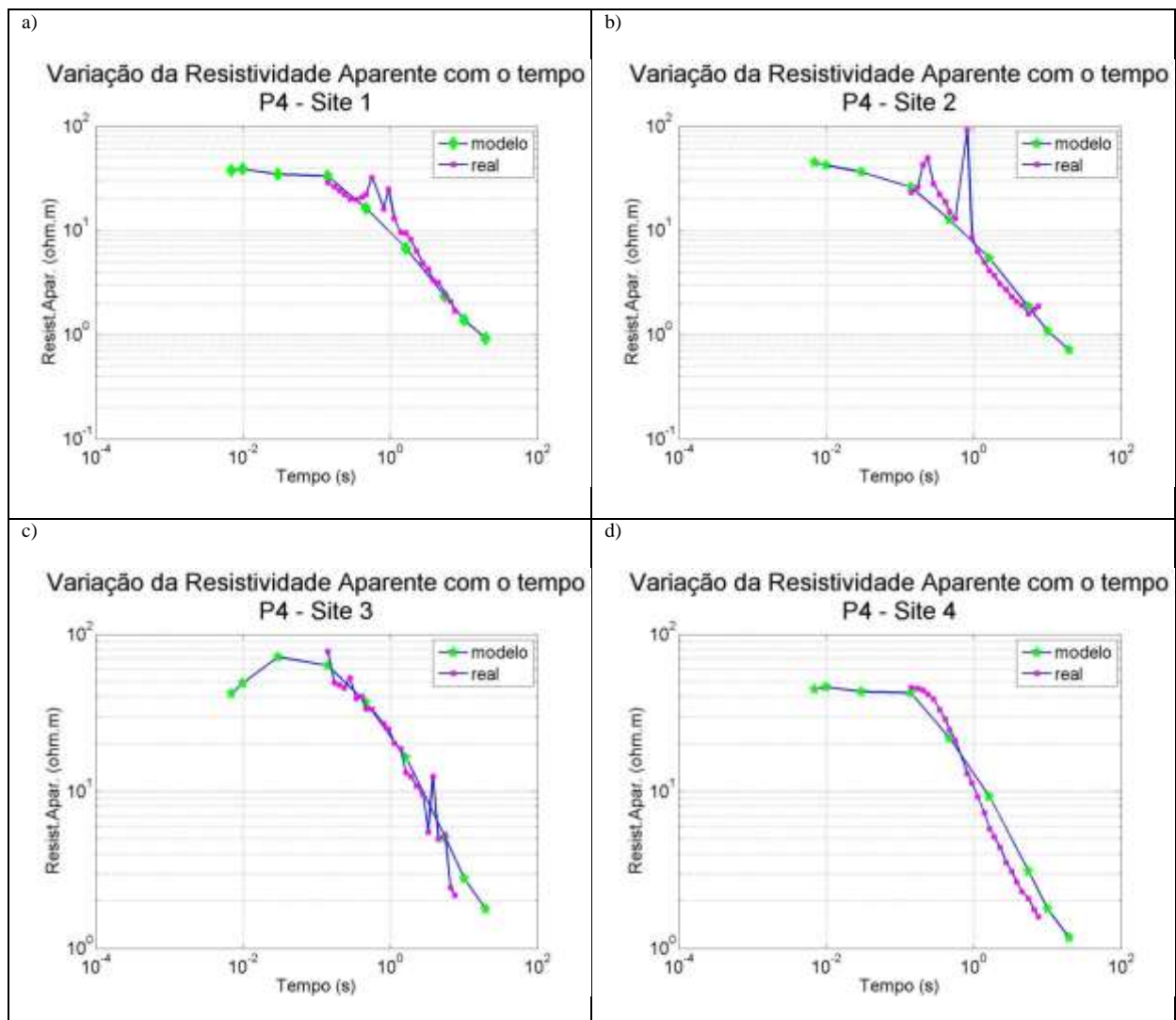


Figura 5.2.1.3 – Conjunto de gráfico que comparam os dados reais obtidos de resistividade através do equipamento científico usado (curva com os dados a rosa) com os dados modelados a partir do modelo fornecido (curva com os dados a verde).



### 5.2.2 Segundo modelo (modelo 221)

Procurou-se ver se os dados poderiam justificar um outro modelo. Assim construiu-se outro modelo designado por modelo 221. As curvas correspondentes à resposta deste novo modelo apresentadas na figura 5.2.2.1 têm um comportamento muito semelhante às ilustradas na figura 5.2.1.1 que correspondem ao modelo 202a. A maior diferença encontra-se nos receptores um e dois ilustrados a verde e vermelho, respectivamente. Para o primeiro verifica-se que tem um decaimento mais acentuado a partir do terceiro instante. No caso do segundo receptor, o decaimento de resistividade é um pouco menos acentuado e a partir do terceiro instante a curva deste receptor anda muito próxima dos valores da curva do primeiro receptor, mas os comportamentos destas duas curvas são diferentes.

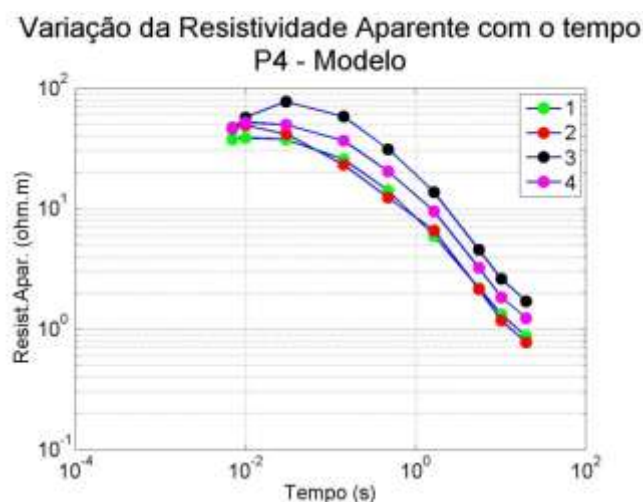


Figura 5.2.2.1 – Dados calculados do modelo usado considerando todos os receptores (sondagens para o tratamento do caso real) existentes no perfil 4 para o modelo 221.

A figura 5.2.2.2 compara os dados tratados no *software* disponível com os dados do modelo 221. Para a primeira sondagem os dados modelados têm valores um pouco mais baixos que os reais, não considerando os dados contaminados. Assim sendo a curva modelada aproxima-se por defeito à real tendo um comportamento semelhante. No caso da segunda sondagem a curva modelada tem um comportamento muito diferente da curva experimental, sendo a curva de dados muito contaminada nos primeiros instantes, o que não garante a comparação o comportamento inicial destas. A sondagem três encontra-se muito contaminada por ruído electromagnético não dando garantias para possíveis comparações. Ainda assim, de modo geral, a curva modela encontra-se bem ajustada à experimental. A curva modelada para a última sondagem não tem as mesmas características que a curva de campo, visto o comportamento das duas ser distinto.

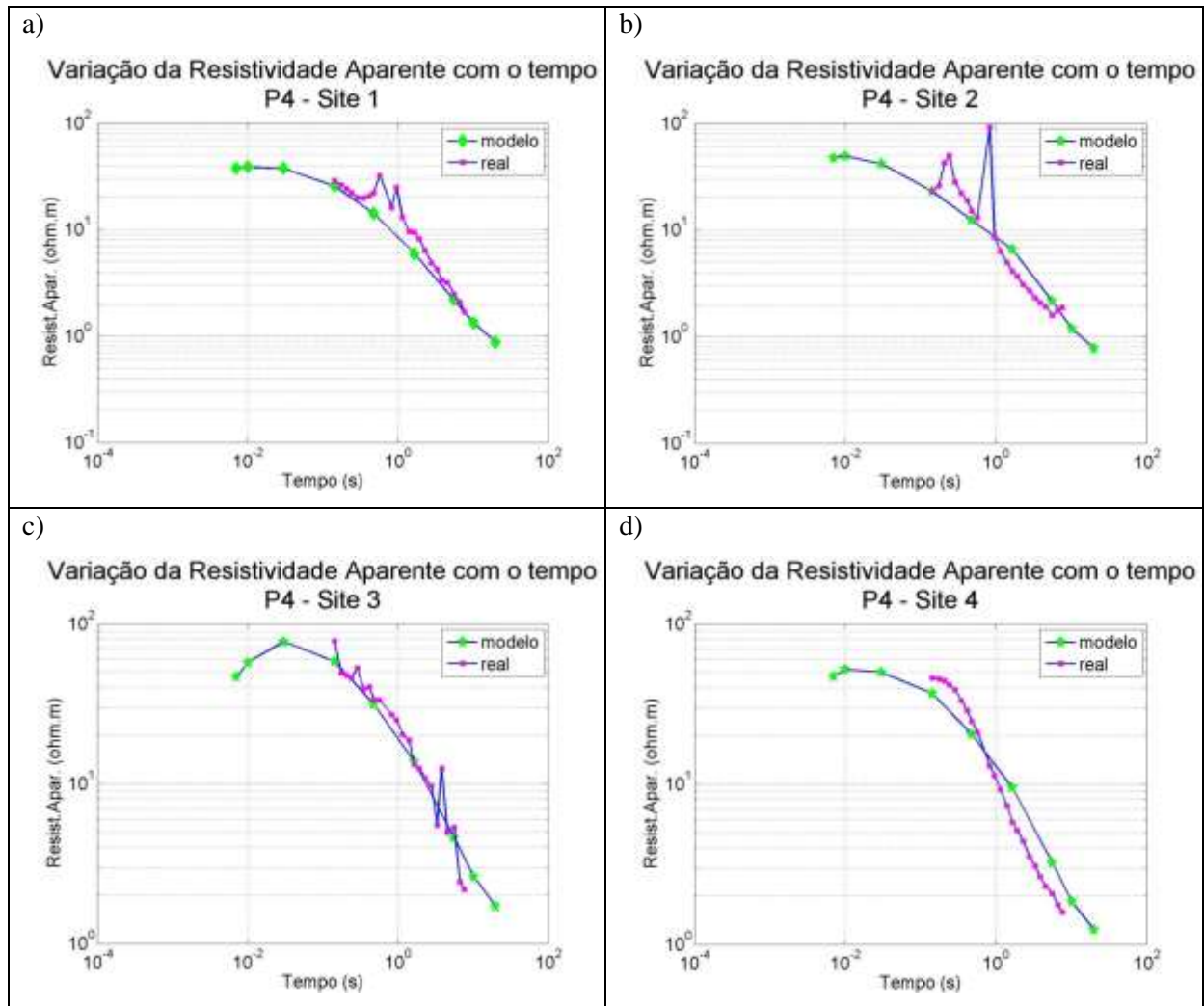


Figura 5.2.2.2 – Conjunto de gráfico que comparam os dados reais obtidos de resistividade através do equipamento científico usado (curva com os dados a rosa) com os dados modelados a partir do modelo fornecido (curva com os dados a verde).

A figura 5.2.2.3 representa a secção 2D do modelo 221. Atendendo à figura verifica-se que o modelo tem uma resistividade mais elevada à superfície e diminui à medida que a profundidade aumenta, excepto na distância entre os 60m e os 75m onde a resistividade é ainda mais elevada. Em profundidade verifica-se a existência de três corpos bem definidos com resistividades iguais a  $0,15\Omega.m$ , tal como se tinha visto para o modelo 202a. Tal como para os dados do ficheiro anterior os valores de resistividade estão compreendidos entre os  $70\Omega.m$  e os  $0,1\Omega.m$ , embora na escala de cores esteja entre os  $70\Omega.m$  e os  $0,10\Omega.m$ .

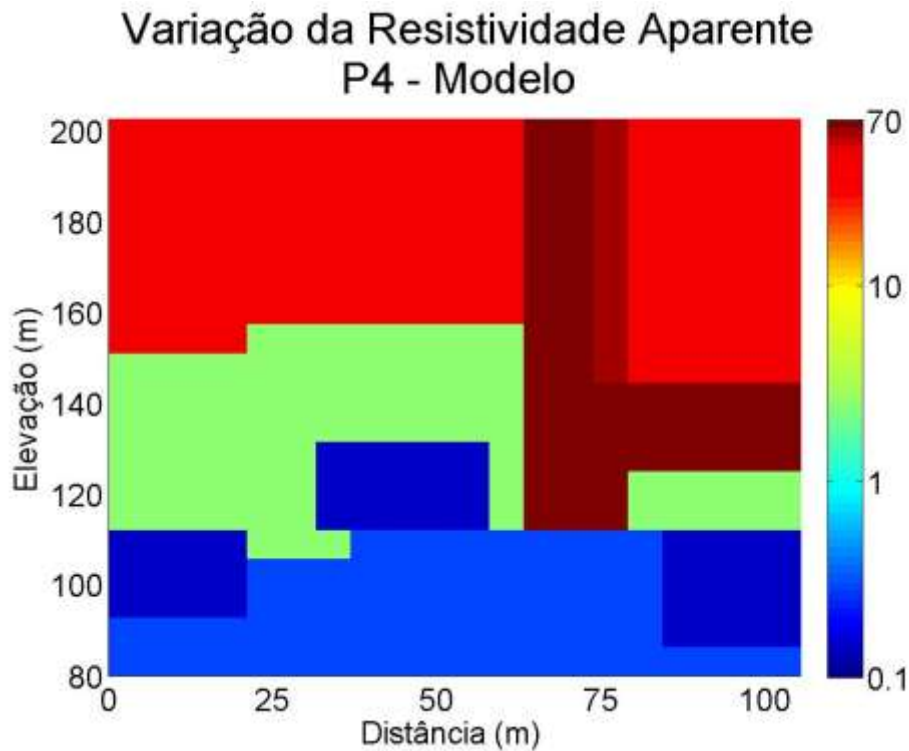


Figura 5.2.2.3 – Modelo 2D de resistividade para o perfil 4, calculado a partir do ficheiro 221, considerando todos os receptores existentes no perfil em estudo.

## 6. Comparação quantitativa dos dados de campo com dados obtidos dos modelos

Neste capítulo pretende-se quantificar a comparação dos dados de campo com os dados modelados através do programa elaborado e fornecido pelo Professor Doutor Fernando Santos para os perfis efectuados e tratados. O objectivo é perceber se o programa modela os dados, com base na realidade, de forma fiável para ser utilizado em futuros trabalhos de prospecção através do método transiente.

Para a comparação entre os dados reais com os dados modelados de resistividade procedeu-se à análise estatística recorrendo do cálculo do erro associado a estes valores através da equação 6.1.

$$erro = \frac{\rho_{real} - \rho_{modelada}}{\rho_{modelada}} \times 100 \quad (6.1)$$

### 6.1 Perfil 1 (P1)

A tabela 1 compara os dados com as respostas do modelo através do erro calculado com base na equação 6.1.

Tabela 1- Anomalia percentual do modelo em relação aos dados adquiridos no campo para o perfil 1

Sondagens	Tempo (ms)	Dados ( $\Omega.m$ )	Dados Modelados ( $\Omega.m$ )	Erro (%)
1	142.33	28.990	28.580	1.435
	478.06	22.300	22.200	0.450
	1656.1	9.380	8.753	7.163
	5595.3	2.460	2.665	-7.692
2	142.33	28.810	28.680	0.453
	478.06	19.960	22.240	-10.252
	1656.1	8.900	8.689	2.428
	5595.3	2.470	2.509	-1.554
3	142.33	41.310	28.700	43.937
	478.06	27.900	22.250	25.393
	1656.1	8.040	8.641	-6.955
	5595.3	2.560	2.421	5.741
4	142.33	27.840	28.610	-2.691
	478.06	22.860	22.210	2.927
	1656.1	6.730	8.624	-21.962
	5595.3	2.190	2.403	-8.864
5	142.33	29.420	28.510	3.192
	478.06	52.380	22.170	136.265
	1656.1	10.870	8.558	27.016
	5595.3	3.360	2.388	40.704

Para a primeira sondagem verifica-se que o modelo tem uma boa aproximação aos dados reais tendo em conta que o maior erro calculado é de 7,692%. Na coluna do erro o sinal negativo apenas indica que o dado modelado é superior ao real. Atendendo a este pormenor verifica-se que a curva modelada tem uma aproximação à real por defeito. Em relação à segunda sondagem verifica-se que também que a resposta do modelo calculado é bastante coerente com os dados. No caso da terceira sondagem há que realçar que os dois primeiros instantes do modelo apresentado nesta tabela correspondem a dados de baixa qualidade na curva de resistividade aparente real, assim sendo e desprezando estes pontos verifica-se que os outros dois pontos têm erros baixos, sendo o maior de 6,955%. Com apenas dois pontos não se pode afirmar que para este receptor esta curva é a mais indicada, mas atendendo a todo o perfil verifica-se que se enquadra dentro deste. Para a sondagem quatro também existe um ponto afectado por ruído tendo apenas três pontos para comparação. Neste receptor tem-se uma curva modelada por defeito, tendo em conta que praticamente todos os pontos modelados são superiores aos dados colectados. Para a última sondagem confirma-se que a curva de campo é muito instável em praticamente todo o tempo de aquisição, logo não se pode definir se o modelo se adequa ou não para esta sondagem.

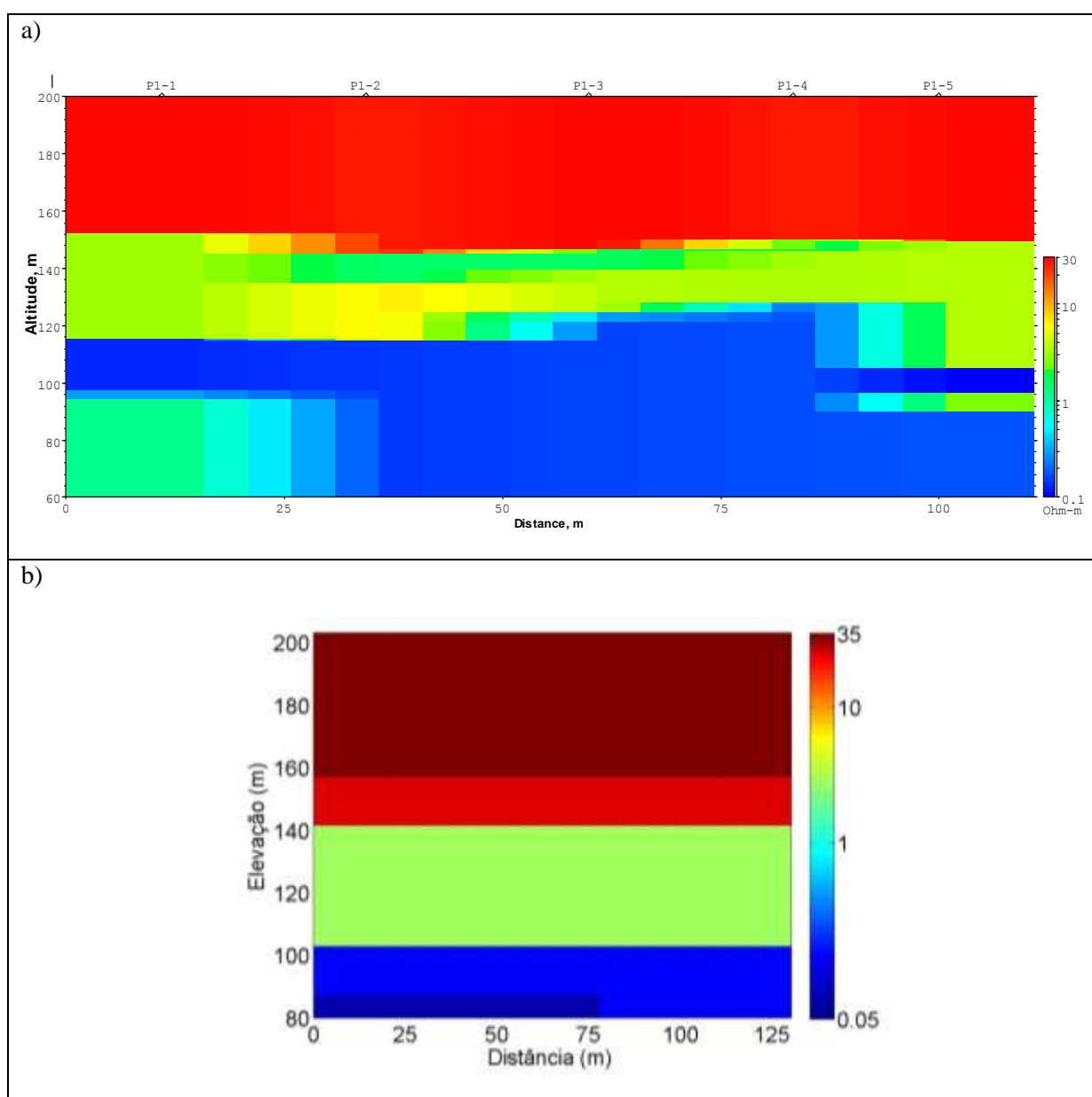


Figura 6.1.1 – Perfil 1: a) esquema 2D da variação da resistividade aparente e b) modelo 2D de resistividade aparente, considerando todos os receptores existentes.

Na figura 6.1.1 apresentam-se dois modelos obtidos (por inversão 1D dos dados e por modelação tentativa e erro 2D). Observando a figura anterior verifica-se que os dois modelos são relativamente parecidos. O modelo apresenta um perfil estratificado até profundidades da ordem de 100m. Em toda a secção vê-se a diminuição da resistividade à medida que a profundidade aumenta. De acordo com o modelo 2D não há necessidade de um corpo mais resistivo em profundidade na zona da sondagem um. Para o quinto receptor não se pode comparar e ter certezas em relação aos dados, uma vez que a curva de resistividade aparente é muito instável e quaisquer conclusões tiradas para esta sondagem seriam incertas.

## 6.2 Perfil 4 (P4)

Tal como dito anteriormente, para este perfil foram apresentados dois modelos diferentes. Inicialmente ir-se-á comparar com o modelo 202a e seguidamente ao modelo 221.

A seguinte tabela vem confirmar o acima exposto. Para os dados modelados pelo modelo 202a verifica-se que no caso da sondagem um existem dois instantes com erros associados elevados, na ordem dos 38-39%, que se encontram no meio das curvas consideradas. Tendo apenas dois pontos e, sendo estes os extremos da curva modelada, a comparação quantitativa tem alguns problemas. Para a segunda sondagem verifica-se que a curva se ajusta por excesso à curva de campo apesar dos erros serem mais elevados que no modelo calculado para o perfil anterior. Apesar da sondagem três ser a mais instável de todo o perfil verifica-se que os instantes comparáveis não apresentam erros muito elevados. Deve-se ter em consideração que para os instantes modelados nesta sondagem não foram eliminados no tratamento dos dados reais com auxílio do *software* do equipamento científico. Como foi dito anteriormente para a última sondagem deste perfil a curva modelada não é a mais indicada para este receptor tendo uma aproximação por defeito para a parte inicial da curva real e por excesso para a restante parte desta, daí a diferença de sinais na coluna dos erros para esta sondagem. Mesmo assim a curva modelada é mais confiável e ajustável nos primeiros dois instantes considerados na comparação feita. De uma forma geral o ajustamento deste modelo é menos bom que o calculado para o perfil um, facto esse confirmado pelas tabelas de erros apresentadas. Este modelo calculado foi apenas o escolhido entre tantos outros calculados porque era o que melhor se ajustava estatisticamente às características das restantes sondagens.

A figura 6.2.1 mostra os três modelos para este perfil. Observando a figura constata-se que existem semelhanças na composição geoelectrica dos diferentes modelos. Todos eles apresentam à superfície uma camada de resistividade mais elevada, sendo os valores de resistividade da mesma ordem para os dois casos. Junto ao receptor três existe uma camada que tem a resistividade mais elevada, trata-se de uma camada estreita com uma profundidade de cerca de 80m no modelo. A resistividade vai decrescendo de forma geral com a profundidade, mas não se trata de um perfil estratificado. Existe a presença de três corpos que estão presentes e bem delimitados para os dois modelos. Este modelo, do ponto de vista visual e de proximidade de valores de resistividade aparente modelada, parece ter uma boa aproximação à realidade.

Em relação ao modelo 202a, a figura seguinte mostra a presença dos corpos com valores de resistividade baixa que se encontram no modelo calculado mais ou menos às profundidades de 80m e 110m para os corpos localizados nas extremidades do modelo e para o corpo situado no meio do modelo às profundidades de 55m e 80m. Para a primeira sondagem confirma-se o valor de resistividade superficial é aproximadamente igual a  $40\Omega.m$  e que o corpo condutor em profundidade aparece em todos os modelos. No caso da segunda sondagem verifica-se que os dois corpos menos resistivos em profundidade, estão representados em todos os modelos embora a estrutura à superfície seja muito diferente nos três modelos. A terceira sondagem confirma que no local deste receptor existe o material geoelectrico mais resistivo à superfície com cerca de  $70\Omega.m$  e que este mesmo corpo se prolonga por uma profundidade considerável. Para este caso pode considerar-se que a eliminação dos pontos da tratamento dos dados foi a mais acertada. Para a última sondagem observa-se que de forma geral o comportamento das camadas é semelhante em todos os modelos com excepção para o modelo 221em que a camada mais superficial é mais condutora. Isto é visível através da curva dos dados, visto

que o decaimento desta é mais acentuado que o da curva do modelo, ou seja, para os dados recolhidos no campo o corpo menos resistivo encontra-se mais superficial situado entre os 130m e os 80m de elevação, enquanto para o modelo este mesmo corpo está situado entre os 120m e os 90m de elevação.

É de salientar que o primeiro receptor do perfil um é o mesmo que o primeiro receptor do perfil quatro. Visualizando a parte lateral esquerda das imagens apresentadas na figura 6.2.1 referentes aos modelos 2D calculados verifica-se que para o mesmo ponto são completamente distintos, mas ao olhar para as tabelas um e dois para a primeira sondagem de cada confirma-se que o modelo calculado com um erro menor é o do perfil um.

O modelo 221 apresenta erros percentuais superiores ao modelo calculado e discutido anteriormente, como é visível na tabela 2.

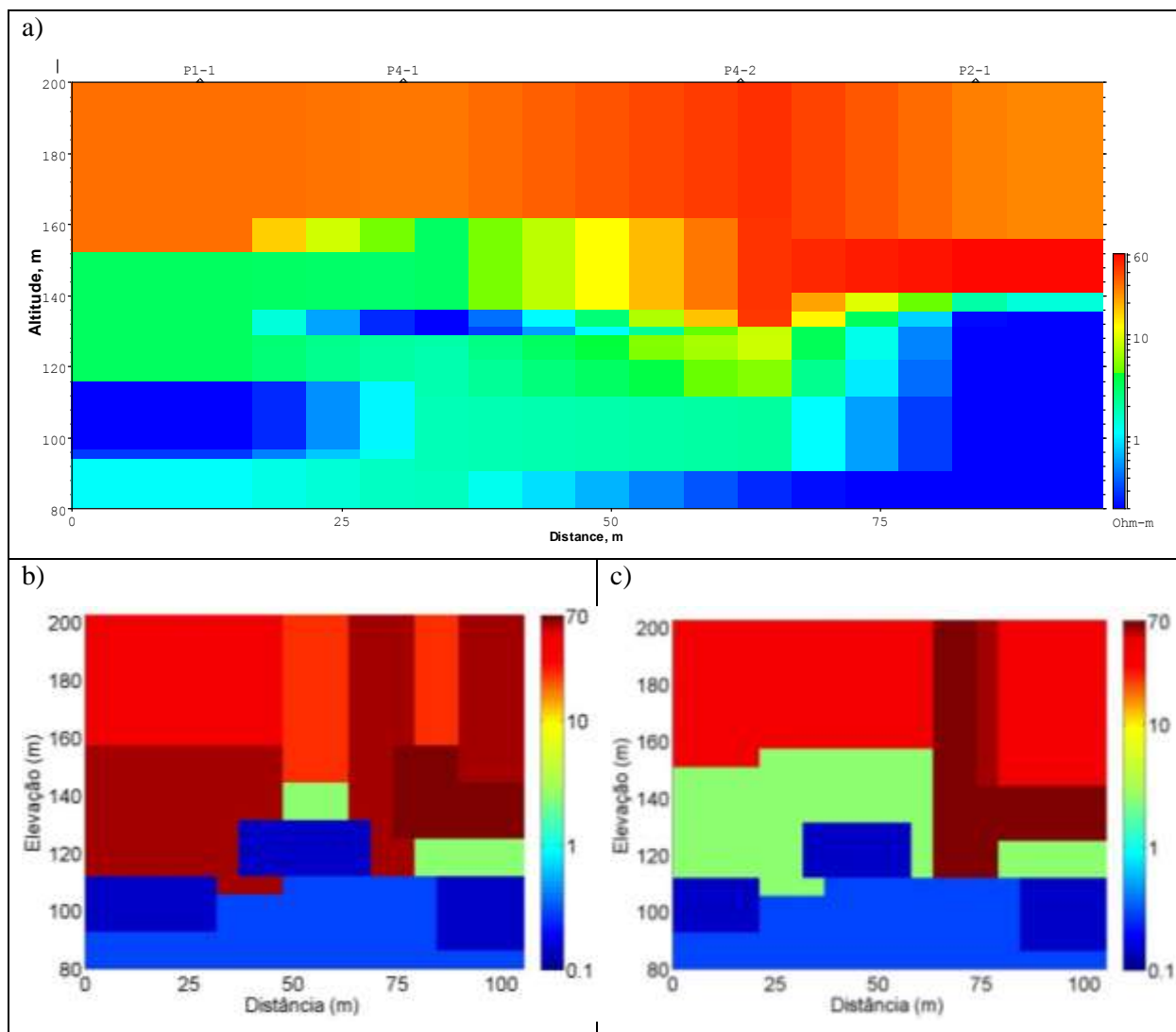


Figura 6.2.1 – Perfil 4: a) esquema 2D da variação da resistividade aparente e b) modelo 2D de resistividade aparente para o ficheiro de entrada 202a e c) modelo 2D de resistividade aparente para o ficheiro de entrada 221, considerando todos os receptores existentes.

Tabela 2- Anomalia percentual dos dois modelos realizados em relação ao dados adquiridos no campo para o perfil 4

Modelo	Sondagens	Tempo (ms)	Dados ( $\Omega.m$ )	Dados Modelados ( $\Omega.m$ )	Erro (%)
202a	1	142.330	28.990	33.250	-12.812
		478.060	22.300	16.170	37.910
		1656.100	9.380	6.745	39.066
		5595.300	2.460	2.334	5.398
	2	142.330	23.060	26.050	-11.478
		478.060	15.120	12.590	20.095
		1656.100	4.110	5.418	-24.142
		5595.300	1.590	1.852	-14.147
	3	142.330	78.270	63.160	23.923
		478.060	33.570	36.650	-8.404
		1656.100	13.180	16.340	-19.339
		5595.300	5.320	5.069	4.952
	4	142.330	46.050	42.320	8.814
		478.060	24.620	21.770	13.091
		1656.100	5.800	9.252	-37.311
		5595.300	2.080	3.082	-32.511
221	1	142.330	28.990	25.630	13.110
		478.060	22.300	14.120	57.932
		1656.100	9.380	5.950	57.647
		5595.300	2.460	2.190	12.329
	2	142.330	23.060	23.110	-0.216
		478.060	15.120	12.360	22.330
		1656.100	4.110	6.600	-37.727
		5595.300	1.590	2.140	-25.701
	3	142.330	78.270	58.180	34.531
		478.060	33.570	31.230	7.493
		1656.100	13.180	13.690	-3.725
		5595.300	5.320	4.560	16.667
	4	142.330	46.050	36.830	25.034
		478.060	24.620	20.420	20.568
		1656.100	5.800	9.480	-38.819
		5595.300	2.080	3.220	-35.404



## 7. Conclusões

Após a inversão 1D das sondagens, através do *software* fornecido pelo fabricante do equipamento científico usado, realizou-se a modelação 2D, por tentativa e erro dos dados, com o programa elaborado pelo Professor Doutor Fernando Santos.

Para o primeiro perfil em estudo (perfil 1) pode concluir-se que se trata de uma zona bem estratificada, em que a resistividade diminui com a profundidade. Para este perfil apenas foi estudado um modelo. Os dados calculados através do modelo apresentam um bom ajustamento com os dados recolhidos. O modelo 2D, visualmente e estatisticamente, é parecido com o pseudo-modelo 2D da variação da resistividade inicialmente obtido a partir dos modelos 1D. O modelo apresenta valores de resistividade aparente parecidos com as obtidas no campo, sendo o erro maior considerado de -21.962%, onde todos os outros erros considerados são inferiores a 11%.

O perfil 4 foi feito numa zona mais heterogénea que o perfil analisado anteriormente. Para este perfil estudaram-se dois modelos. Para o caso do modelo 202a obteve-se uma melhor análise quantitativa dos dados, sendo este erros mais baixos, e sendo as curvas obtidas através do modelo mais semelhantes aos dados recolhidos no campo, tanto em comportamento como em valores de resistividade aparente. O erro maior considerado neste modelo é de -14.147%. O modelo 221 visualmente é mais semelhante ao pseudo-modelo 2D da variação da resistividade obtido dos modelos 1D. Este modelo, apesar de ter erros calculados mais elevados que o modelo 202a, parece representar melhor a geologia do perfil estudado. Para este modelo, o erro maior, que no modelo 202a é de -14.147%, para este modelo é de -25.701%.

Atendendo ao facto de se ter dois perfis com geologia diferente, sendo o primeiro estratificado e o segundo heterogéneo composto por corpos bem definidos distintos do restante perfil, conclui-se que a inversão e a modelação dos dados é mais fácil de se concretizar com uma maior confiança para um perfil com camadas estratificadas.

O acima exposto sugere que quando se faz o tratamento e análise de um modelo não se pode ter apenas em conta a análise quantitativa ou a geologia da zona, mas sim conciliar os dois, uma vez que podem haver factores externos que influenciem os dados aquando da recolha de dados no campo. Assim pode-se obter um melhor estudo da zona de forma a ter certezas da geologia ali existente.

## 8. Referências

- Almeida, E. R. (2011), *Caracterização geoeléctrica na região de Bebedouro – SP por meio de sondagens electromagnéticas no domínio do tempo (TDEM)*, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Geofísica, 11 – 31
- Braga, A. C. (2007), *Módulo: Métodos Geoeléctricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas*, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia Aplicada, 3 – 31
- Carvalho, J. M. F. (1996), *Área de Moleanos (Maciço Calcário Estremenho): Litologia temática e sondagens*, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa
- Crispim, J. A. (1995), *Dinâmica Cársica e Implicações Ambientais nas Depressões de Alvados e Minde*, Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Especialidade Geologia do Ambiente, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, 124 – 129, 175 – 181 e 305 – 338
- Fittermann, D. V., Labson, V. F. (2005), *Electromagnetic Induction Methods for Environmental Problems*, Butler, Dwain K., *Near-Surface Geophysics Part 1: Concepts and Fundamentals*, Society of Exploration Geophysics, 301 – 356
- Informações gerais sobre o equipamento TEM-FAST 48HPC no website: [www.aemr.net](http://www.aemr.net) (Maio de 2012)
- Kirsch, R. (Ed.), Christiansen, A.V., Auken, E. e Sørensen (2006), K., *The Transient Electromagnetic Method. Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*, Springer, 2º Edition, Chapter 6, 179 – 225
- Manupella, G., Telles Antunes, M., Coasta Almeida, C. A., Azerêdo, A. C., Barbosa, B., Cardoso, J. L., Crispim, J. A., Duarte, L. V., Henriques, M. H., Martins, L. T., Ramalho, M. M., Santos, V. F., Terrinha, P. (2000). *Carta Geológica de Portugal – Vila Nova de Ourém*, Folha 27-A, escala 1:50000, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa
- Monteiro Santos, F. (2006), *Propriedades Eléctricas das Rochas*, Prospecção Geofísica I, Cap.2
- Monteiro Santos, F. (2006), *Técnicas para investigação de estruturas superficiais – Métodos Indutivos*, Prospecção Geofísica I, Cap.4
- Nabighian, Misac N. (1988), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – Theory*, Society of Exploration Geophysics, Investigations in Geophysics #3, Vol.1, Chapter 2, 3 and 4
- Ward, S. H., Hohmann, G. W. (1988), *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications*. Nabighian, Misac N., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – Theory*, Volume 1, Society of Exploration Geophysics, Chapter 4